



Lección Inaugural: Interfaces cerebro-máquina basadas en señales electroencefalográficas

Ponente: Dr. José María Azorín Poveda

Excelentísimo y Magnífico Señor Rector,
Molt Honorable President de la Generalitat,
Ilustrísima Señora Secretaria General,
Excelentísimo y Magnífico Señor Rector Honorario,
Excelentísimos Señores Vicerrectores,
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,
Compañeros y Miembros de la Comunidad Universitaria,
Señoras y Señores,

La oportunidad de impartir una lección inaugural dentro del acto de apertura de un curso académico es sin duda uno de los actos más gratificantes de la vida académica. Por ello, deseo en primer lugar expresar mi sincero agradecimiento a la Universidad Miguel Hernández de Elche por la ocasión que me ofrece de impartir esta lección inaugural en el año en el que se conmemora el 20 aniversario de la creación de nuestra institución.

Hasta hace relativamente pocos años, la posibilidad de controlar dispositivos con el pensamiento quedaba limitado al género de la ciencia-ficción. Sin embargo, hoy en día, gracias al trabajo conjunto de ingenieros y neurocientíficos, sabemos que es una realidad, siendo posible controlar dispositivos únicamente a partir de nuestra actividad cerebral mediante lo que se denomina interfaces cerebro-máquina.

Podemos definir una interfaz cerebro-máquina como un sistema que procesa la actividad cerebral de la persona y la traduce en información que puede ser empleada para generar comandos de control de un dispositivo externo sin necesidad de realizar ningún movimiento muscular. El hecho de que sea posible interactuar con nuestro



entorno sin la necesidad de mover ningún músculo hace que estas interfaces sean una ayuda particularmente relevante para personas con limitaciones motoras.

Para que una interfaz cerebro-máquina sea capaz de generar comandos de control a partir de la actividad cerebral de la persona, debe en primer lugar registrar las señales cerebrales de ésta y digitalizarlas para su posterior procesamiento. En el procesamiento de las señales se extraen las características más representativas de la información cerebral que se desea identificar, para a continuación traducirlas a comandos utilizando para ello un clasificador encargado de detectar diferentes patrones de actividad cerebral.

Según el método utilizado para la adquisición de las señales cerebrales, las interfaces se pueden clasificar en dos grandes grupos: invasivas y no invasivas.

En las interfaces invasivas, la actividad cerebral se registra mediante electrodos que se implantan en el cerebro, por debajo del cráneo, lo que requiere una intervención quirúrgica. Dentro de este tipo de interfaces, las técnicas más invasivas hacen uso de implantes de microelectrodos para registrar la actividad de grupos de neuronas o incluso de neuronas individuales. Las señales cerebrales obtenidas con estas técnicas son las que mejor calidad y resolución proporcionan. Sin embargo, su principal inconveniente es la alta complejidad de la intervención quirúrgica intracraneal para implantar los electrodos. Además, estas intervenciones conllevan un riesgo de daño tisular y de infección, y la estabilidad y durabilidad de los implantes a largo plazo sigue siendo un problema a resolver.

Otra técnica invasiva de registro de la actividad cerebral es la electrocorticografía. Esta técnica es a menudo considerada como parcialmente invasiva, ya que, aunque precisa de una operación quirúrgica, ésta es mucho menos compleja. En esta técnica los electrodos para adquirir la actividad cerebral se sitúan sobre la superficie del cerebro,



por debajo del cráneo, de forma que se consigue una gran calidad en las señales registradas.

Sin embargo, por evidentes cuestiones éticas y con la finalidad de evitar riesgos médicos, para los seres humanos son preferibles las interfaces no invasivas. Una de las técnicas no invasivas más utilizadas para el registro de la actividad cerebral es la electroencefalografía (o EEG), que se basa en registrar las señales eléctricas corticales a través de electrodos colocados sobre la superficie del cuero cabelludo. Estas señales son consecuencia de la actividad neuronal en la corteza cerebral y se transmiten a través del cráneo y la piel gracias a las propiedades conductoras del cuerpo humano. La principal ventaja de esta técnica es su gran resolución temporal, ya que las señales registradas provienen de forma directa de los impulsos eléctricos de la capa superficial del cerebro. Sin embargo, los impulsos eléctricos que se generan en zonas concretas del córtex, al transmitirse, se mezclan con las contribuciones de áreas adyacentes provocando una disminución considerable de la resolución espacial de la información registrada.

El primer registro de señales EEG en humanos lo realizó el neurólogo alemán Hans Berger en la década de los años 20 del siglo pasado. Durante el pasado siglo, esta técnica fue ampliamente utilizada para la detección de la epilepsia, siendo en la década de los 90 cuando el uso de la electroencefalografía experimentó un gran progreso para todo tipo de aplicaciones. Actualmente, los sistemas de registro de EEG han experimentado un rápido desarrollo surgiendo equipos relativamente económicos y portátiles, lo que ha permitido el desarrollo de numerosas aplicaciones basadas en interfaces cerebrales.

Como se ha indicado anteriormente, este método tiene como inconveniente su limitada resolución espacial. Además de ello, otra desventaja es la baja relación señal-ruido de las señales registradas. Sin embargo, en la actualidad, los avances experimentados en el procesamiento de señales y en inteligencia artificial han



permitido diseñar con éxito multitud de interfaces basadas en señales EEG para diferentes tipos de aplicaciones, tales como aplicaciones de control de dispositivos externos y de comunicación, así como aplicaciones de asistencia y de rehabilitación.

La información obtenida de las señales EEG se describe habitualmente en términos de ritmos corticales. Estos ritmos van asociados a diferentes rangos de frecuencias en los que vibran los diferentes potenciales cerebrales. El ancho de banda de las señales EEG está contenido aproximadamente en el rango de entre 1 y 100 Hz, siendo posible diferenciar entre cinco bandas frecuenciales: delta (<4 Hz), theta (4-7 Hz), alfa (8-15 Hz), beta (16-31 Hz) y gamma (>32 Hz). En función de los rangos de predominancia frecuencial de las señales que se registren, se puede diferenciar entre multitud de fenómenos corticales asociados a distintas respuestas neurológicas.

Existen diferentes tipos de interfaces cerebro-máquina basadas en señales EEG en función del tipo de actividad cerebral que se desea detectar. En el caso de las interfaces espontáneas, también denominadas endógenas, la persona debe realizar una acción cognitiva o tarea mental de forma voluntaria. Dentro de este tipo de interfaces, las más populares son las basadas en imaginación motora, en las que la persona debe imaginar un determinado tipo de movimiento, pero sin realizar el movimiento, con la finalidad de generar de forma voluntaria un determinado comando de control. La interfaz cerebral, a través de un adecuado análisis de la actividad neuronal en las regiones cerebrales destinadas a acciones motoras, se encargará de detectar el proceso de imaginación motora y convertirlo en un determinado comando.

Utilizando este paradigma, en la UMH desarrollamos una interfaz cerebral que permite controlar un robot planar a partir de la actividad cerebral de la persona, detectando si la persona está pensando en un movimiento de su brazo derecho o de su brazo izquierdo. Esta interfaz registra la actividad cerebral de la persona mediante 16 electrodos colocados principalmente en la zona del córtex motor. Mediante un procesamiento basado en el periodograma y un clasificador basado en máquinas de



vector soporte, la interfaz es capaz de detectar la tarea mental de la persona. En esta interfaz la persona controla el movimiento a derecha o izquierda de un cursor en la pantalla, según la tarea mental realizada, con la finalidad de en primer lugar indicar si quiere mover el extremo del robot en horizontal o en vertical, para seguidamente indicar si quiere mover el extremo del robot hacia arriba o hacia abajo, si previamente indicó un movimiento vertical, o hacia la izquierda o hacia la derecha, si previamente indicó un movimiento horizontal. De este modo, la persona puede controlar el movimiento del robot únicamente mediante su actividad cerebral.

Otro paradigma empleado en el desarrollo de interfaces cerebrales basadas en señales EEG es la detección de los potenciales relacionados a eventos. Un potencial relacionado a eventos (también conocido como ERP) es una respuesta cerebral resultado de un evento sensorial, cognitivo o motor específico. Uno de los potenciales más ampliamente explorado en el campo de las interfaces cerebrales es el denominado P300. P300 es un potencial que se caracteriza por una deflexión positiva del voltaje de las señales EEG aproximadamente 300 ms después de producirse un estímulo visual, auditivo o táctil. Este potencial se produce con la aparición de un evento esperado infrecuente y se detecta con mayor facilidad en el lóbulo parietal. Otro ejemplo de potencial es el denominado N2PC, que se caracteriza por una desviación negativa en la señal EEG producida aproximadamente 200 ms después de que se produzca el estímulo.

Basándonos en estos dos potenciales, en la UMH desarrollamos una interfaz cerebral que permite navegar a través de Internet únicamente a partir de la actividad cerebral de la persona. En esta interfaz las señales EEG son registradas mediante 16 electrodos colocados en la zona del córtex parietal y el córtex visual. Con la finalidad de detectar de forma sencilla los potenciales, los usuarios visualizan una pantalla en la que se les muestra un número suficientemente amplio de opciones (por ejemplo, letras del alfabeto, números o iconos que corresponden a acciones específicas). De entre estas opciones, el sujeto debe seleccionar una en función de la acción que desea realizar,



prestando atención a la deseada. Las diferentes opciones parpadean de forma aleatoria en la pantalla. De este modo, es posible determinar la elección del usuario simplemente seleccionando el estímulo que provoca los mayores potenciales. Esta técnica se conoce como paradigma *oddball*. Mediante este procedimiento, el usuario es capaz de navegar a través de Internet, controlando el cursor y escribiendo caracteres.

Asimismo, empleando este mismo paradigma, en la UMH desarrollamos un sistema basado únicamente en señales EEG para que personas con daño cerebral o medular severo pudieran comunicar sus necesidades básicas.

Otros potenciales relacionados a eventos que han sido ampliamente estudiados son los potenciales motores, que son inducidos por la realización de un movimiento y reflejan el proceso de preparación del mismo. Cuando se va a producir un movimiento las neuronas afectadas se sincronizan o desincronizan, provocando oscilaciones acopladas al estímulo. Estas oscilaciones son detectadas analizando el cambio inducido en la potencia de la señal a través de la diferencia entre la línea base previa al evento y un período posterior a éste. La desincronización corresponde a un valor negativo, es decir, a una disminución en la potencia, mientras que la sincronización corresponde a un aumento de la potencia de la señal.

En la UMH empleamos este paradigma para desarrollar una interfaz cerebral que permite controlar un exoesqueleto robótico de miembro superior durante la rehabilitación de personas con limitaciones motoras. Esta interfaz registra la actividad cerebral de la persona mediante 16 electrodos colocados principalmente en la zona del córtex motor. Mediante un procesamiento basado en la Transformada Rápida de Fourier y un clasificador basado en máquinas de vector soporte, la interfaz es capaz de detectar cuando la persona tiene la intención de mover el brazo, de forma que, una vez detectado que la persona quiere mover su brazo, se envía un comando para controlar el exoesqueleto, posibilitando de este modo que la persona realice la



extensión o flexión de su brazo. Esta interfaz fue validada de forma satisfactoria con diferentes pacientes del Servicio de Rehabilitación del Hospital General Universitario de Alicante, verificándose que pacientes que habían sufrido un ictus y estaban afectados por una hemiplejía eran capaces de controlar el movimiento de su brazo mediante la interfaz cerebro-máquina y el exoesqueleto.

Existen otros paradigmas que pueden ser empleados para el desarrollo de interfaces cerebrales. A este respecto, analizando la actividad de las señales EEG en la banda gamma, en la UMH desarrollamos una interfaz cerebral que es capaz de detectar el nivel de atención del usuario durante la marcha mientras éste hace uso de un exoesqueleto robótico para asistirle en la marcha. La interfaz registra las señales EEG mediante 32 electrodos, extrayendo sus características mediante el método de entropía máxima y realizando su clasificación mediante un clasificador basado en análisis discriminante lineal. Esta interfaz proporciona un valor numérico entre 0 y 1 dependiendo del nivel de atención del usuario durante la marcha, permitiendo de este modo conocer el grado de implicación de la persona durante la rehabilitación.

Si bien el campo de las interfaces cerebro-máquina basadas en señales EEG ha experimentado un gran avance en la última década, todavía quedan retos importantes que acometer para lograr que esta tecnología no quede confinada a centros de investigación o a centros clínicos. Por citar algunos de estos retos, por ejemplo, es necesario mejorar la tecnología de adquisición basada en electrodos secos, ya que la mayor parte de interfaces requieren que se emplee gel conductor en cada electrodo para mejorar la calidad del registro de las señales, lo que ralentiza el proceso de colocación de electrodos, al mismo tiempo que implica que el uso de la interfaz esté limitado a la duración de las propiedades de conductividad del gel. Asimismo, es necesario desarrollar estándares para esta tecnología, con la finalidad de acelerar su transferencia al mercado. A este respecto hay que destacar el esfuerzo que está llevando a cabo el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, también conocido como IEEE, que está ya trabajando en este tema.



Nos encontramos en un periodo apasionante desde el punto de vista tecnológico, en el que la tecnología avanza a un ritmo trepidante. Y es de esperar que las interfaces cerebro-máquina se contagien de este avance, de forma que sus posibilidades crezcan de forma considerable en los próximos años. De hecho, grandes empresas han empezado a trabajar en este campo dado su potencial. Por citar un ejemplo, en la conferencia de desarrolladores de Facebook de este año, la compañía reveló que tiene a un equipo de 60 ingenieros trabajando en el desarrollo de una interfaz cerebro-máquina no invasiva con el objetivo de que escriba hasta 100 palabras por minuto.

Con la progresión de este campo en los últimos años y las altas expectativas de futuro, unido al esperado avance de la tecnología, es de esperar que dentro de unos años las interfaces cerebro-máquina se empleen en aplicaciones inimaginables a día de hoy.

En cualquier caso, para alcanzar esa meta será necesario continuar el trabajo intenso en este campo, ya que, parafraseando a Albert Einstein, el único lugar donde el éxito viene antes que el trabajo es el diccionario.

Muchas gracias